

IAP8 Rec'd at JPO 08 DEC 2005

明細書

非接触導電率測定装置

技術分野

- [0001] 本発明は、導電率を測定することに関し、特にマイクロ波を用いて非接触で導電率を測定するものである。

背景技術

- [0002] マイクロ波による方法は、シリコンウェーハの非接触による導電率測定に用いられている(非特許文献1、特許文献1参照)。空气中を伝播することができるマイクロ波を使用することにより、非接触測定を実現することができる。また、マイクロ波は、その反応が試料の電気的性質に直接関連しているという利点を有している。

しかしながら、マイクロ波による試料の測定に対する専用の装置がなく、電子機器の受動的、能動的なネットワークのSパラメータを測定するネットワークアナライザをその代替品として、通常使用している。このネットワークアナライザはサイズが大きく高価なものであり、産業上の機器として用いることが難しい。

- [0003] 非特許文献1:Ju, Y., Inoue, K., Saka, M. and Abe, H., Contactless measurement of electrical conductivity of semiconductor wafers using the reflection of millimeter waves, Journal of Applied Physics Letters, Vol. 81 n 19, 2002, pp.3585-3587

特許文献1:特開2004-177274号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0004] 本発明の目的は、上述の問題点を解決し、マイクロ波により導電率を非接触で測定するためのコンパクトな機器を提供することである。

課題を解決するための手段

- [0005] 上述の目的を達成するために、本発明は、マイクロ波を用いた非接触導電率計測装置であって、マイクロ波を発振するオシレータと、該オシレータと接続したサーキュレータと、該サーキュレータと接続した、マイクロ波を試料に対して送信し、反射波を受信するホーンアンテナと、前記サーキュレータと接続した、受信したマイクロ波の大

きさの2乗に比例する電圧を出力するディテクタと、前記電圧を入力して、導電率を計算する計算手段とを備えることを特徴とする。

前記サーキュレータは、装置の動作に影響する定常波を減少させるために、アイソレータを介してオシレータと接続することもできる。

シリコンウェーハを測定する場合、前記オシレータで発振するマイクロ波の周波数は、94GHzとすることがよい。

発明の効果

[0006] 上述の構成により、簡単でコンパクトな構成のマイクロ波を用いた非接触導電率測定装置を提供することができる。

発明を実施するための最良の形態

[0007] 本発明の実施形態について、図面を用いて説明する。

<マイクロ波による導電率測定の装置構成>

はじめに、本発明の実施形態であるマイクロ波を用いた非接触による導電率測定のための装置構成を、図1を用いて説明する。以下では、シリコンウェーハの導電率測定を例にして説明する。

ガンダイオードを用いたオシレータ110で発振されたマイクロ波は、アイソレータ120、サーキュレータ130、ホーンアンテナ140を経てシリコンウェーハ150に照射される。アイソレータ120は、装置の動作に影響する定常波を減少させるために使用した。その後、同一のホーンアンテナ140で反射波が受信され、サーキュレータ130と接続しているディテクタ160で検波されて、電圧として出力する。ディテクタ160では電界の振幅の二乗に比例した出力電圧が得られる。出力電圧は、A/D変換器でデジタル信号に変換され、コンピュータ(図示せず)に入力される。ここで、シリコンウェーハ150からの反射波の振幅は反射係数の絶対値に比例するため、出力電圧も反射係数の絶対値の二乗に比例する。反射係数と導電率とは一定の関係があるので、コンピュータにより関係式を用いて計算することにより、シリコンウェーハ150の導電率を求めることができる。これらの原理等については、以下で詳しく説明する。

[0008] <マイクロ波による導電率測定の原理>

上述の構成により、シリコンウェーハに照射したマイクロ波の反射係数を測定するこ

とで、シリコンウェーハの導電率測定を行う。以下にその原理を述べる。

図2に示すように、材料1, 2, 3からなる三層のスラブに 材料1からマイクロ波をz軸方向に照射した場合を考える。ここで、実際の測定を考慮して、材料1, 3は空気、材料2はシリコンウェーハとする。ここに E_i^+ , E_i^- ($i=1, 2, 3$) は各材料i中をz軸に対し、正方向および負方向に伝播する電界の振幅を示す。 ϵ_0 , μ_0 と空気中の誘電率、透磁率、 ϵ_2 , μ_2 , σ_2 はシリコンウェーハの誘電率、透磁率、導電率で、dはシリコンウェーハの厚さである。またバー E_{rs} はシリコンウェーハ表面、すなわち材料1と2の界面からの反射波である。さらにバー E_{rb} は、照射されたマイクロ波の一部がシリコンウェーハ内に入射した後に材料2と3の境界で反射し材料1へ返ってくるマイクロ波である。シリコンウェーハからの反射波は、バー E_{rs} とバー E_{rb} のベクトル和で与えられ、その振幅は E_1^- である。各材料中の電界及び磁界は、Z方向の位置の関数として表される。

[0009] いま、三層スラブ内のMaxwell方程式は、

[数1]

$$\bar{E}_1(z) = \hat{x}[E_1^+ e^{-j\beta_1 z} + E_1^- e^{j\beta_1 z}] \quad (1)$$

$$\bar{H}_1(z) = \frac{\hat{y}}{\eta_1}[E_1^+ e^{-j\beta_1 z} + E_1^- e^{j\beta_1 z}] \quad (2)$$

$$\bar{E}_2(z) = \hat{x}[E_2^+ e^{-\alpha_2 z - j\beta_2 z} + E_2^- e^{\alpha_2 z + j\beta_2 z}] \quad (3)$$

$$\bar{H}_2(z) = \frac{\hat{y}}{\eta_2}[E_2^+ e^{-\alpha_2 z - j\beta_2 z} - E_2^- e^{\alpha_2 z + j\beta_2 z}] \quad (4)$$

$$\bar{E}_3(z) = \hat{x}[E_3^+ e^{-j\beta_3 z}] \quad (5)$$

$$\bar{H}_3(z) = \frac{\hat{y}}{\eta_3}[E_3^+ e^{-j\beta_3 z}] \quad (6)$$

$$\eta_1 = \eta_3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (7)$$

$$\eta_2 = \frac{j\omega\mu}{\gamma_2} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2 = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon}} \quad (9)$$

$$\beta_1 = \beta_3 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad (10)$$

で得られる。ここにバー E_i 、バー H_i はそれぞれ各材料 ($i=1-3$) 内の電界および磁界を表す。 $j=\sqrt{(-1)}$ で、 η_1 , η_3 は空気の特性インピーダンス、 η_2 はシリコンウェーハの特性インピーダンスを表す。また γ_2 はシリコンウェーハの伝播係数で、 α_2 と β_2

は γ_2 の実部と虚部を示す。さらに β_1 および β_3 は空気の伝播係数の虚部を示す。加えて ω はマイクロ波の角周波数である。得られたMaxwell方程式は次式(11)～(14)で与えられる $z=0$ 、 $z=d$ での境界条件を満たさなければならない。

[数2]

$$\bar{E}_1(0) = \bar{E}_2(0) \quad (11)$$

$$\bar{H}_1(0) = \bar{H}_2(0) \quad (12)$$

$$\bar{E}_2(d) = \bar{E}_3(d) \quad (13)$$

$$\bar{H}_2(d) = \bar{H}_3(d) \quad (14)$$

さらに、シリコンウェーハは非磁性体であるから

[数3]

$$\mu = \mu_0 \quad (15)$$

と表示できる。以上の式(1)～(15)より、マイクロ波がシリコンウェーハに入射した際の反射係数 Γ が次式(16)～(18)で得られる。ここでシリコンウェーハの誘電率および透磁率が一定であるため、 Γ は導電率 σ_2 および厚さ d の関数として求まる。

[数4]

$$|\Gamma| = \left| \frac{E_1^-}{E_1^+} \right| = \left| \frac{-\eta_1 \eta_2 + \eta_2 \eta_3 + (\eta_2^2 - \eta_1 \eta_3) \tanh(\alpha_2 d + j\beta_2 d)}{\eta_1 \eta_2 + \eta_2 \eta_3 + (\eta_2^2 + \eta_1 \eta_3) \tanh(\alpha_2 d + j\beta_2 d)} \right| \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{(-\varepsilon_2 \omega + \sqrt{\sigma_2^2 + \varepsilon_2^2 \omega^2}) \sqrt{\mu_0 \omega (\varepsilon_2 \omega + \sqrt{\sigma_2^2 + \varepsilon_2^2 \omega^2})}}{\sqrt{2} \sigma_2} \quad (17)$$

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{\mu_0 \omega (\varepsilon_2 \omega + \sqrt{\sigma_2^2 + \varepsilon_2^2 \omega^2})}}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

[0010] 次にシリコンウェーハ表面でのマイクロ波の反射を考える。シリコンウェーハ表面でのマイクロ波の反射係数 Γ_s は

[数5]

$$|\Gamma_s| = \left| \frac{-\eta_1 + \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \right| \quad (19)$$

で与えられ、導電率 σ_2 のみの関数である。

式(16)と式(19)を用いて、シリコンウェーハ表面での反射係数の絶対値 $|\Gamma_s|$ と反射係数の絶対値 $|\Gamma|$ とを比較すると、図3の表の結果となる。図3の表は、導電率(S/m):行、厚さ(μm):列の条件で計算した比を示している。この図3において、網掛けしている厚さ及び導電率の条件では、この差は1%以下である。このため、この条件下では、反射係数の絶対値 $|\Gamma|$ は、厚さdとは独立に、シリコンウェーハ表面での反射係数の絶対値 $|\Gamma_s|$ 、すなわち導電率 σ により決定することができる。

[0011] <測定に使用する周波数>

シリコンウェーハの導電率測定に最適なマイクロ波の周波数を検討する。

導電率測定に印加されるマイクロ波の周波数は、周波数領域における複素導電率及び反射係数に対するウェーハの厚みの効果を考察することにより決定される。

金属材料(シリコンウェーハも含まれる)の複素導電率の周波数依存性は、Drudeモデルより式(20)で与えられる。

[数6]

$$\sigma_{\omega} = \frac{\sigma_{dc}}{1 - j\omega\tau} \quad (20)$$

ここで、上記の式において、 ω はマイクロ波の角周波数; σ_{ω} は ω におけるシリコンウェーハの複素導電率; σ_{dc} は直流(dc)又は低い周波数の導電率(実部のみ); τ は電子の平均衝突時間; $j = \sqrt{-1}$ である。

[0012] さて、室温での金属(銅)の衝突時間は 3.33×10^{-14} sec である。このとき、周波数が 100GHz 以下であれば $\omega \tau \gg 1$ が成り立ち、 $\sigma_{\omega} \approx \sigma_{dc}$ と近似できる。ここで、シリコンウェーハの衝突時間は金属の衝突時間と同程度と考えてよい。このため、シリコンウェーハにおいても、周波数が 100GHz 以下であれば $\sigma_{\omega} \approx \sigma_{dc}$ と考えられ、周波数が導電率に与える影響を考えなくてよい。

一方、周波数が増加すると、シリコンウェーハ内部でのマイクロ波の減衰は大きくなる。そのため、ウェーハの底部表面からの反射は無視できる。このため、反射波はウェーハの上部表面からのみと考えることができ、マイクロ波の応答信号は、ウェーハの

厚さにより影響されていない。ウェーハの厚さに影響されない導電率測定には、高周波を印加することが望ましい。

以上に述べた相反する2つの理由から、以下で説明する実施例では、シリコンウェーハの導電率測定に最適と考えられる周波数94GHzを用いた。

実施例

- [0013] 上述のマイクロ波を用いた測定装置の構成において、実際にシリコンウェーハを用いて、導電率を測定した。

試験片として直径100mm、厚さ $525 \pm 25 \mu\text{m}$ でPをドープしたn型のシリコンウェーハ $S_1 - S_7$ の7枚を用意した。なお、測定に用いたシリコンウェーハはcz法によるもので、測定に用いた面がミラー加工されている。四探針法で測定したシリコンウェーハの導電率 σ 範囲は $58 \sim 212 \text{S/m}$ であった。また、導電率が $2.8 \times 10^7 \text{S/m}$ で、寸法 $50 \times 50 \times 2 \text{mm}$ の銅板を用意した。いま、シリコンウェーハ $S_1 - S_7$ の反射係数の絶対値と出力電圧を $|\Gamma_k|$ と v_k ($k=1 \sim 7$)、銅板の反射係数と出力電圧を $|\Gamma_{cu}|$ 、 v_{cu} とする。このとき銅板表面でマイクロ波は全反射、すなわち $|\Gamma_{cu}| = 1$ と考えられるから $|\Gamma_k|$ が次式で得られる。

[数7]

$$|\Gamma_k| = \sqrt{\frac{v_k}{v_{cu}}} \quad (21)$$

ところで測定の際に、一部のマイクロ波はセンサ先端で反射する。このためディテクタにおいて検波されるマイクロ波は、センサ先端および被測定物からの反射波のベクトル和となる。このときスタンドオフ距離変化により被測定物からの反射波の位相が変化すると、検波されるマイクロ波も変化する。つまりマイクロ波による測定では、スタンドオフ距離が常に一定であることが要求される。

- [0014] 表1に7枚のシリコンウェーハに対して測定した四探針法による導電率 σ およびマイクロ波測定による出力電圧 v_k と式(21)より得られた反射係数 $|\Gamma_k|$ を示す。ここに銅板に対する出力電圧 v_{cu} は、0.8654Vであった。

[表1]

N O	σ [S/m]	v_k [V]	$ \Gamma_k $
S ₁	58.2	0.179	0.455
S ₂	63.3	0.194	0.473
S ₃	78.9	0.226	0.511
S ₄	91.7	0.249	0.536
S ₅	125.0	0.306	0.595
S ₆	205.2	0.408	0.686
S ₇	212.0	0.416	0.693

$|\Gamma_k|$ と $|\Gamma_s|$ の値の間に差が見られた。これはシリコンウェーハ表面以外からの反射の影響やセンサの指向性、装置内のコンポーネントでのマイクロ波のもれなどが原因と考えられる。しかしながら、 $|\Gamma_k|$ と導電率とは1対1の対応関係がある。このことから反射係数の絶対値 $|\Gamma_k|$ を測定することで、シリコンウェーハの導電率を測定できる。

[0015] 続いて、導電率測定が可能か検証する。まず、S₁, S₃, S₅, S₇を用いて、有効な反射係数の絶対値と導電率の関係式を求めた。

[数8]

$$\sigma_m = C_1 |\Gamma_k|^3 + C_2 |\Gamma_k|^2 + C_3 |\Gamma_k| + C_4 \quad (22)$$

ここに、 σ_m は、図1に構成のマイクロ波測定により評価された導電率で、 C_i ($i=1 \sim 4$) は定数で、 $C_1 = 412.4 \text{S/m}$ 、 $C_2 = 407.1 \text{S/m}$ 、 $C_3 = 128.5 \text{S/m}$ 、 $C_4 = 10.4 \text{S/m}$ であった。続いて、得られた関係式(22)を用いて、S₂, S₄, S₆に対する σ_m を求めた。結果を図4に示す。図4に示すように、評価結果と四探針法による測定結果はよく一致しており、非接触で導電率を評価できることが証明された。これにより、オンラインでのシリコンウェーハの導電率評価が、シリコンウェーハの厚さとは独立に行えることが期待される。

[0016] ところで、シリコンウェーハの誘電率および透磁率は、一定と考えられる。このとき、上述と同じ実験時条件であれば式(22)より、マイクロ波を用いてシリコンウェーハの導電率を求めることができる。また、スタンドオフ距離やセンサなどの実験条件が変わっても、数枚のシリコンウェーハを用いて定数 C_i を再度決定することで、導電率評価

が可能となる。

さらにガリウム砒素(GaAs)などのシリコンウェーハ以外の材料に対しても、誘電率および透磁率が一定であれば、数枚の試験片を用いてC_iを決定することで導電率評価が可能となる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]実施形態の装置構成を示す図である。

[図2]マイクロ波のシリコンウェーハに対する送信と反射のモデルを示す図である。

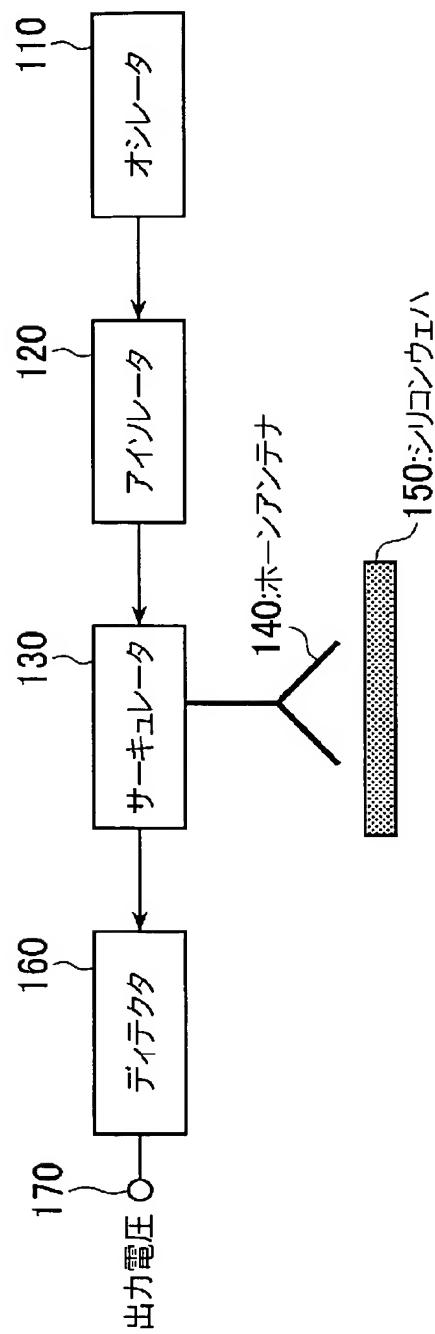
[図3]式(16)と式(19)で計算した、シリコンウェーハ表面での反射係数の絶対値 |Γ_s| と反射係数の絶対値 |Γ|との比を示す表である。

[図4]図1の装置により得た導電率と従来の4点プローブ法での導電率との比較のグラフを示す図である。

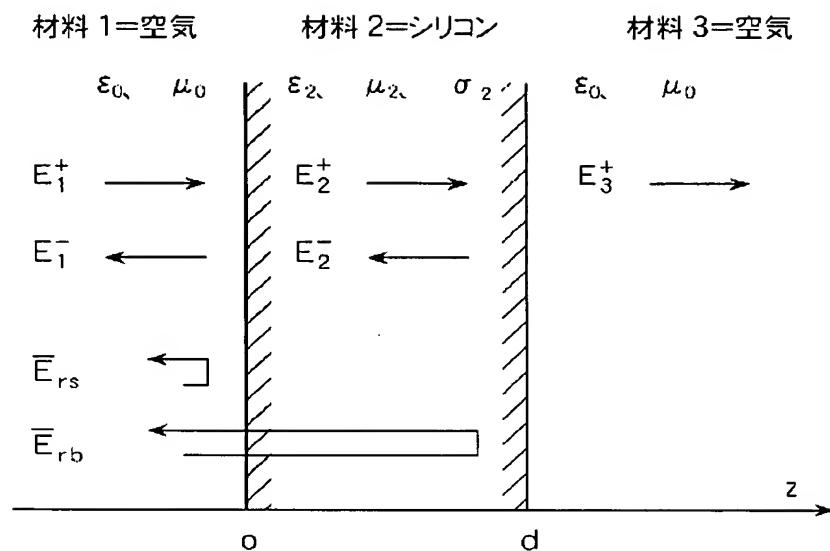
請求の範囲

- [1] マイクロ波を用いた非接触導電率計測装置であって、
　　マイクロ波を発振するオシレータと、
　　該オシレータと接続したサーキュレータと、
　　該サーキュレータと接続した、マイクロ波を試料に対して送信し、反射波を受信する
　　ホーンアンテナと、
　　前記サーキュレータと接続した、受信したマイクロ波の大きさの2乗に比例する電圧
　　を出力するディテクタと、
　　前記電圧を入力して、導電率を計算する計算手段と
　　を備えることを特徴とする非接触導電率計測装置。
- [2] 請求項1に記載の非接触導電率計測装置において、
　　前記サーキュレータは、アイソレータを介してオシレータと接続していることを特徴と
　　する非接触導電率計測装置。
- [3] 請求項1又は2に記載の非接触導電率計測装置において、
　　シリコンウェーハを測定する場合、前記オシレータで発振するマイクロ波の周波数
　　は、94GHzであることを特徴とする非接触導電率計測装置。

[図1]



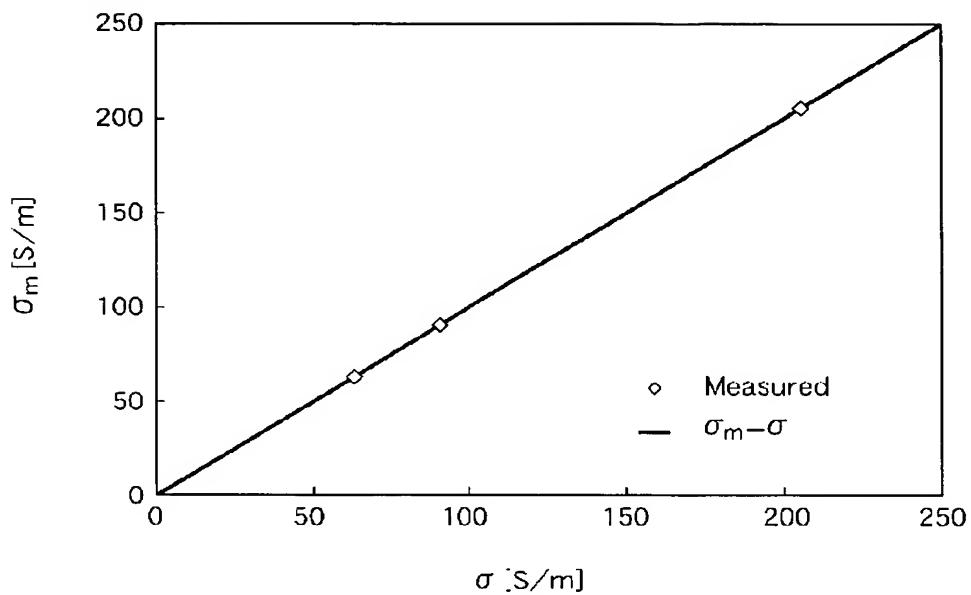
[図2]



[図3]

	100	200	300	400	500	525	600	700	800
1000	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
700	0.988	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
600	0.985	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
500	0.983	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
450	0.982	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
400	0.982	1.000	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
350	0.982	0.999	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
300	0.983	0.995	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
250	0.985	0.989	1.003	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
200	0.990	0.977	1.005	1.001	1.000	1.000	1.001	1.000	1.000
150	0.996	0.957	1.005	1.004	1.000	1.000	1.000	1.001	1.000
100	1.000	0.918	0.993	1.016	1.000	0.998	0.997	1.000	1.000
70	0.992	0.878	0.962	1.039	1.009	1.001	0.990	0.996	1.001
50	0.971	0.836	0.916	1.072	1.033	1.014	0.978	0.982	1.002
30	0.923	0.776	0.838	1.137	1.118	1.062	0.950	0.930	0.997
20	0.884	0.738	0.787	1.177	1.229	1.113	0.915	0.870	0.976
15	0.860	0.717	0.758	1.189	1.322	1.142	0.884	0.826	0.950
10	0.834	0.695	0.730	1.178	1.442	1.156	0.837	0.773	0.903
5	0.805	0.673	0.700	1.127	1.535	1.116	0.773	0.712	0.827
3	0.793	0.664	0.689	1.092	1.523	1.073	0.742	0.687	0.788
1	0.780	0.656	0.677	1.047	1.456	1.012	0.709	0.661	0.745

[図4]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/016410

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ G01R27/02, G01R27/26, G01N22/00, H01L21/66

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHEDMinimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ G01R27/02, G01R27/26, G01N22/00, H01L21/66

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
 Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 9-21837 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 21 January, 1997 (21.01.97), Full text; Figs. 1 to 7 (Family: none)	1-3
X	JP 61-173171 A (Mitsubishi Metal Corp.), 04 August, 1986 (04.08.86), Full text; Figs. 1 to 10 (Family: none)	1-3

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
01 February, 2005 (01.02.05)Date of mailing of the international search report
15 March, 2005 (15.03.05)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類(国際特許分類(IPC))

Int C1' G01R27/02, G01R27/26, G01N22/00, H01L21/66

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料(国際特許分類(IPC))

Int C1' G01R27/02, G01R27/26, G01N22/00, H01L21/66

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2005年
 日本国登録実用新案公報 1994-2005年
 日本国実用新案登録公報 1996-2005年

国際調査で使用した電子データベース(データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP 9-21837 A (日本電信電話株式会社) 1997. 01. 21 全文、図1-7 (ファミリーなし)	1-3
X	JP 61-173171 A (三菱金属株式会社) 1986. 08. 04 全文、第1-10図 (ファミリーなし)	1-3

 C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
- 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
- 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献(理由を付す)
- 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
- 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

- 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
- 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
- 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
- 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

01. 02. 2005

国際調査報告の発送日

15. 3. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官(権限のある職員)

中村 直行

2S 9214

電話番号 03-3581-1101 内線 3258